ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИРКАТОРЕ ТИПА ТРИОД С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

А.Г. Жерлицын, Г.В. Мельников

Приведены результаты исследований эффективности генерации СВЧ излучения в виркаторе с виртуальным катодом. Рассмотрены процессы группировки электронов, обратная связь в триоде, оказывающие влияние на эффективность генерации.

1. Введение

Наиболее актуальным вопросом при исследовании генерации СВЧ излучения в различных типах виркаторов является повышение эффективности преобразования энергии пучка в энергию СВЧ излучения [1]. Как показывают эксперименты, проведенные в последнее время, эффективность в виркаторах, как правило, составляет единицы процентов. В тоже время эксперименты, проведенные в виркаторе типа триод с виртуальным катодом (ВК) в S-диапазоне частот, показывают возможность генерации гигаваттного уровня мощности с эффективностью до 12 % [2], а на низком уровне мощности эффективность достигала 30 % [3].

В данном сообщении представлены результаты исследования эффективности генерации СВЧ излучения в триоде с ВК.

2. Группировка электронов

Для эффективного преобразования энергии пучка в СВЧ излучение необходимо обеспечить упорядоченное движение электронов в потоке, т.е. их группировку. В триоде с ВК колеблющиеся между реальным и виртуальным катодами электроны представляют собой систему нелинейных осцилляторов, и их упорядоченное движение обеспечивается, прежде всего, фазовой группировкой.

В теоретической работе [4] было проведено исследование эффективности генерации в триоде с ВК в предположении, что фактором, определяющим группировку электронного потока, является несинхронность колебаний электронов в самосогласованной потенциальной яме. С учетом влияния внешнего колебательного контура и конечного времени жизни электронов в пространстве взаимодействия показано, что при такой группировке триод с ВК выходит на режим стационарной генерации с электронным КПД ~ 10 %. Полученные же в экспериментах КПД более 10 % свидетельствуют о том, что наряду с фазовой группировкой действуют и другие механизмы группировки. Один из таких механизмов - фазовая селекция электронов на электродах триода и стенках вакуумной камеры.

На рис. 1 представлены результаты вычисления электронного КПД с учетом фазовой селекции при прозрачности анода $T = 0{,}8$. Для сравнения приведена зависимость электронного КПД, полученная без учета селекции электронов при тех же параметрах. Из рис. 1 видно, что в течение трех периодов колебаний электронов КПД определяется фазовой группировкой, а затем в результате роста самосогласованного ВЧ поля определяющей становится фазовая селекция, и триодная система выходит на режим стационарной генерации с КПД 30 %.

Проведенные эксперименты подтверждают, что в триоде с ВК имеет место механизм фазовой селекции [5]. Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 2. Для обнаружения "неправильно-фазных" электронов при генерации СВЧ колебаний в триодной системе в центре катода - 1 просверлено отверстие, за которым помещен цилиндр Фарадея - 9. Отверстие закрывалось алюминиевой фольгой - 8 толщиной 10 мкм, которая исключала попадание на цилиндр ионов из триода, ускоренных в катод-анодном промежутке. При наличии фазовой селекции "неправильно-фазные" электроны, получив дополнительную энергию из ВЧ поля и преодолев потенциал катода, через отве-

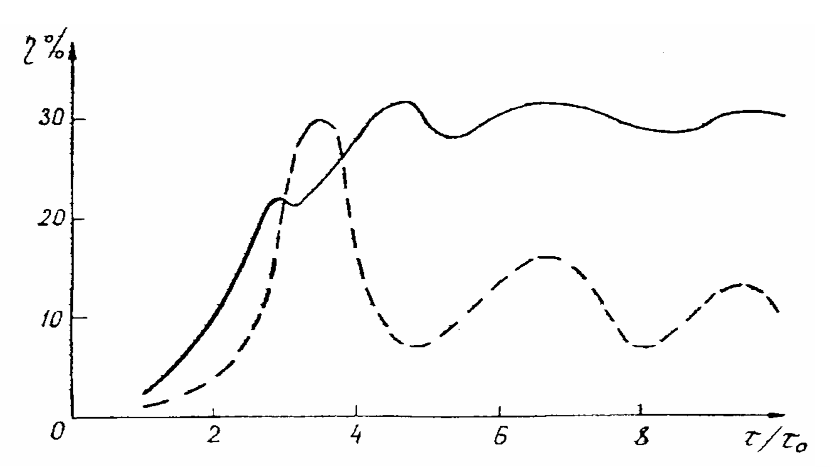


Рис. 1. *Зависимость электронного КПД от соотношения τ/τ_0. Сплошная кривая - с учетом фазовой селекции, пунктирная - без учета, τ_0 - время пролета электронов в электронном промежутке катод-виртуальный катод, τ - время генерации СВЧ колебаний*

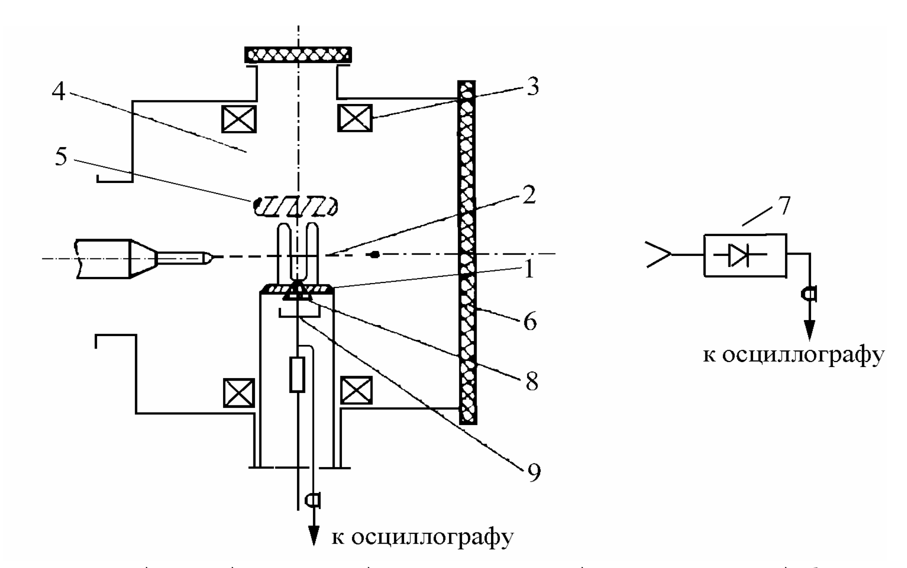


Рис. 2. *Схема эксперимента - 1: 1) катод, 2) анод-сетка, 3) катушка соленоида, 4) вакуумная камера, 5) область виртуального катода, 6) окно для вывода СВЧ излучения, 7) приемная антенна с детекторным блоком, 8) фольга, 9) цилиндр Фарадея*

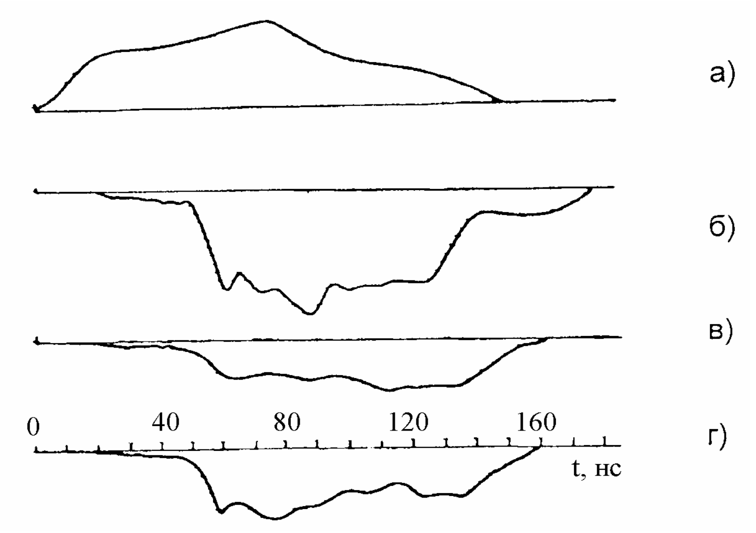


Рис. 3. *Типичные осциллограммы импульсов: а) тока в триоде, б) СВЧ излучения в триоде, в) тока с цилиндра Фарадея, г) высокочастотной модуляции тока с цилиндра Фарадея*

рстие в нем попадают на цилиндр Фарадея. В экспериментах цилиндр Фарадея зарегистрировал ток "неправильно-фазных" электронов и ВЧ модуляцию потока этих электронов.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3, из которого видно, что сигнал на цилиндре Фарадея возникает в тот момент, когда в системе появляется осциллирующий поток электронов, и исчезает, когда осцилляция прекращается. Уменьшение мощности СВЧ излучения в триоде приводит к уменьшению амплитуды сигнала с цилиндра Фарадея. Так, уменьшение мощности в 10 раз привело практически к исчезновению сигнала с цилиндра, т.е. сигнал настолько мал, что при данной чувствительности регистрирующей аппаратуры импульс тока не наблюдали. Была зарегистрирована ВЧ модуляция потока "неправильно-фазных" электронов и измерена частота модуляции.

Установлено, что модуляция происходит на частоте генерируемых в триоде СВЧ колебаний. Оценка энергии этих электронов по фольгам разной толщины дает величину более 100 кэВ и хорошо согласуется с расчетным значением энергии "неправильно-фазных" электронов.

3. Обратная связь в триоде с ВК

Отличительной особенностью генерации в триоде с ВК по сравнению с другими типами виркаторов является то, что в этой системе процессы формирования пучка и преобразования энергии пучка в энергию СВЧ излучения происходят в одном и

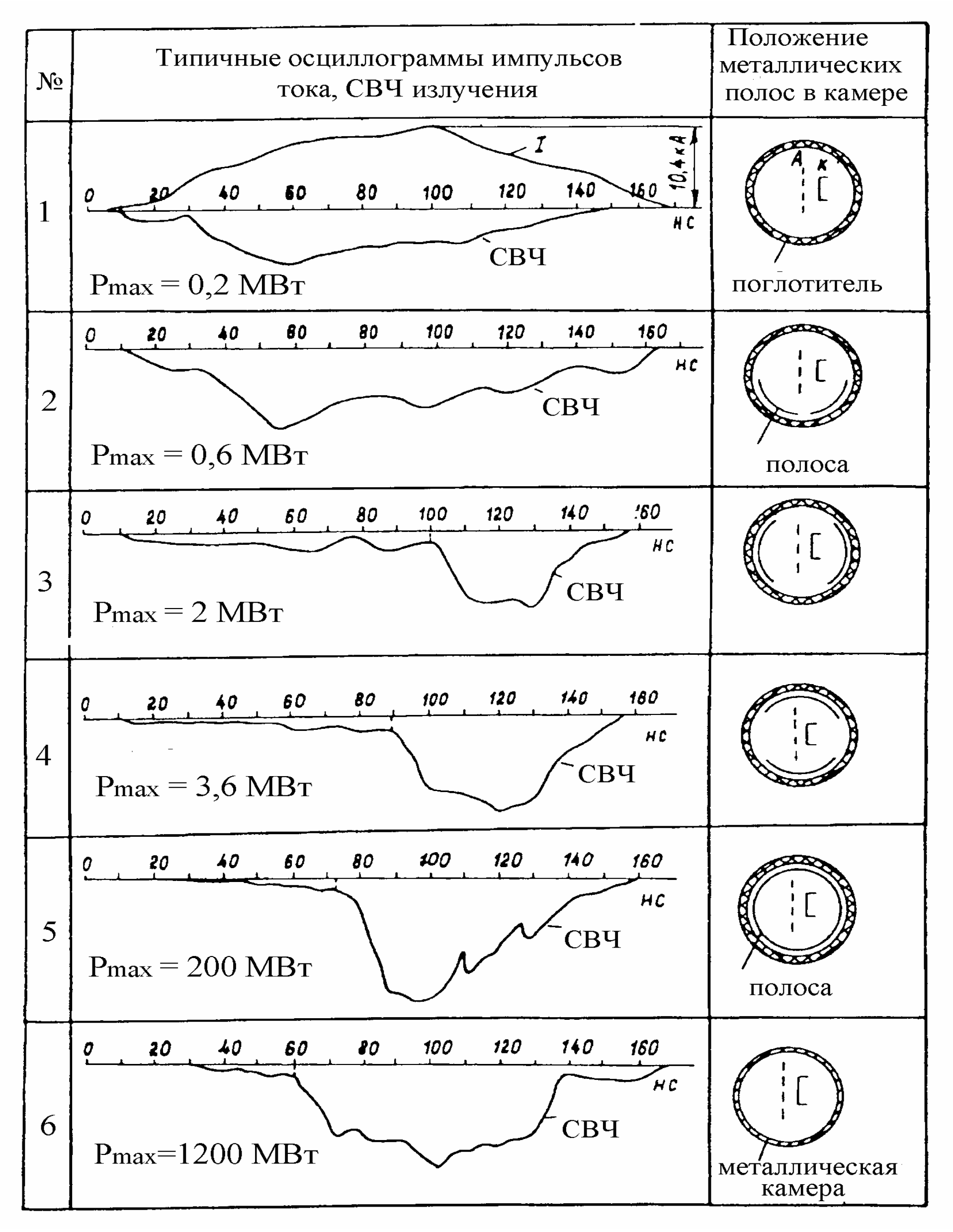


Рис. 4. Влияние вакуумной камеры на процесс генерации излучения

том же объеме (рис. 2), являющимся одновременно электродинамической структурой (резонатором) виркатора. Это, безусловно, оказывает влияние на процесс генерации и ее эффективность, поскольку в этом случае в системе наиболее эффективно действует обратная связь между пучком и СВЧ полем, возбужденным в триоде. В виркаторе, именуемым "виртод" [6], для повышения эффективности генерации до 17 %, специальным (искусственным) образом создавалась дополнительная обратная связь. В триоде с ВК этого не требуется. Более того, в этой системе обратная связь создается одновременно с возбуждением СВЧ полей пучком, как бы автоматически, без вмешательства извне.

Влияние обратной связи в триоде с ВК на эффективность генерации было исследовано экспериментально. В эксперименте в качестве резонатора триода использовалась цилиндрическая вакуумная камера, покрытая изнутри поглощающим материалом с коэффициентом отражения в рабочей полосе частот не более 3 %. СВЧ излучение выводилось через окно - 6.

Эксперименты проводились при энергии электронов 0,5 МэВ, токе до 18 кА, длительности импульса 160 нс. Обратная связь в камере изменялась за счет размещения на поверхности поглотителя экранов, выполненных из металлической фольги в виде полос, рис. 4.

Во всех случаях параметры пучка (энергия электронов, ток, сечение пучка) были неизменными. При этом генерация СВЧ колебаний осуществлялась на частоте осцилляции электронов между реальным и виртуальным катодами, равной 2,94 ГГц. Однако, как видно из рис. 4, процесс генерации в каждом случае протекает по-разному. В отсутствии обратной связи, когда практически все излучение поглощается, рис. 4 (1), излучение начинается с появления тока осциллирующих электронов во времени и изменяется приблизительно по закону изменения тока. Максимальная мощность СВЧ излучения не превышала 0,2 МВт.

Расположение полос в камере, как показано на рис. 4 (2-4), изменяет процесс генерации во времени. В этом случае появляется возможность многократного взаимодействия СВЧ излучения с осциллирующим потоком, что приводит к резкому нарастанию мощности излучения при некоторых значениях тока (стартовый ток $I_{старт}$). Скорость нарастания амплитуды СВЧ импульса больше, чем скорость нарастания импульса тока. Передний фронт импульса излучения составляет несколько наносекунд. Величина стартового тока зависит от размеров полос и их положения в камере. Это, очевидно, связано с диаграммой излучения осциллирующих электронов, которая зависит от энергии электронов. При энергиях электронов не более 0,5 МэВ излучение с наименьшей интенсивностью происходит вдоль их осцилляций.

Поэтому, при расположении полос в системе, рис. 4 (2), обратная связь более слабая по сравнению с обратной связью в системе, рис. 4 (3). На рис. 4 (5) показаны результаты измерений, при которых кроме полос, расположенных, как на рис. 4 (3 и 4), в торце камеры напротив выходного окна помещались дополнительные две полосы. Это привело к уменьшению стартового тока с 10 до 8 кА и увеличению интенсивности излучения почти в 50 раз.

Наибольшая мощность излучения наблюдалась в металлической камере, рис. 4 (4), имеющей такую же геометрическую форму и размеры, что и камера с поглотителем. В ней интенсивность излучения достигала 1,2 ГВт, стартовый ток снизился до $I_{старт}$ = 7,3 кА.

Эти исследования показали, что использование в триоде металлической камеры, в которой одновременно формируется пучок, возбуждаются СВЧ поля, обусловливает преобразование энергии пучка в энергию СВЧ излучения, обеспечивает условия создания обратной связи и возможность генерации с высокой эффективностью.

В продолжении исследования влияния обратной связи в триоде с ВК на эффективность генерации были проведены эксперименты по определению условия ее создания и оптимизации. Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 5.

В этой схеме принимались во внимание результаты предыдущих экспериментов с обратной связью. А именно, размещение отражающих полос в торце камеры напротив окна для вывода СВЧ излучения приводит к резкому увеличению интенсивности излучения. Поэтому в схеме эксперимента - 2 (рис. 5) торцевая стенка камеры была выполнена в виде короткозамыкающего поршня. Поршень перемещали вдоль оси камеры, таким образом изменялась длина камеры. Эксперименты проводили при трех величинах катод-анодного зазора $d_{K\text{-}A}$ - 16, 18 и 20 мм, соответственно. Наименьшее

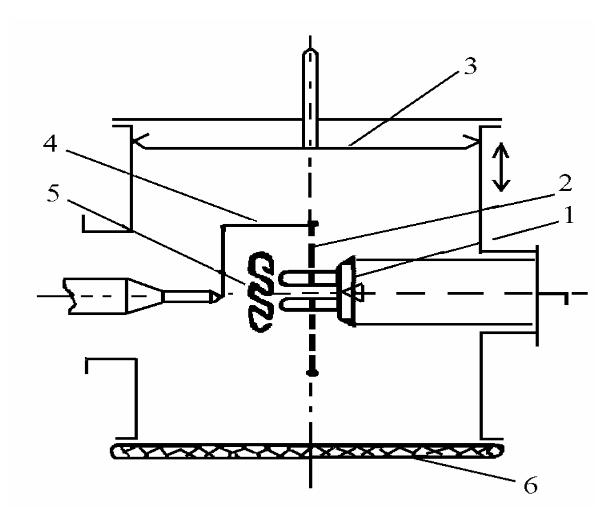


Рис. 5. *Схема эксперимента - 2: 1) катод, 2) анод-сетка, 3) короткозамыкающий поршень, 4) вакуумная камера, 5) область виртуального катода, 6) окно для вывода СВЧ излучения*

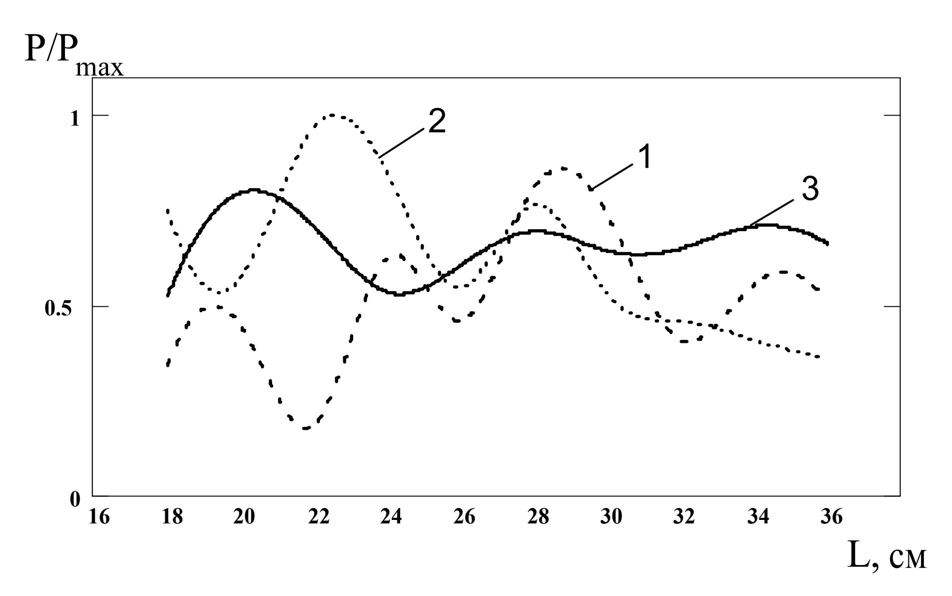


Рис. 6. *Зависимости относительной мощности излучения от положения экрана при разных катод-анодных зазорах d_{K-A}: 1) 16; 2) 18; 3) 20 мм*

расстояние между поршнем и анодом-сеткой было 18 см и ограничивалось оно электрической прочностью промежутка между оправкой анода-сетки и поршнем.

На рис. 6 представлены зависимости мощности излучения в относительных единицах от положения поршня относительно оси катода при разных катод-анодных зазорах.

Из рис. 6 видно, что при перемещении поршня вдоль камеры мощность излучения изменяется. Причем изменение мощности излучения имеет периодический характер.

При зазоре d_{K-A} - 16 мм максимальная мощность излучения была зарегистрирована при расположении поршня на расстоянии 29 см от оси катода на частоте излучения 3,4 ГГц. При зазоре d_{K-A} - 18 мм - на расстоянии 23 см и на частоте излучения 3,2 ГГц. При зазоре d_{K-A} - 20 мм - на расстоянии 20 см и на частоте 3,1 ГГц.

4. Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что в триоде с виртуальным катодом имеет место механизм фазовой селекции. При взаимодействии пучка с высокочастотным полем, электроны, попадающие в ускоряющую фазу СВЧ колебаний ("неправильно-фазные" электроны), получают дополнительную энергию, достаточную для преодоления потенциалов реального и виртуального катодов, и покидают область взаимодействия, оседая на катоде и стенках вакуумной камеры. Удаление этих электронов происходит периодически с частотой, равной частоте излучения. Электроны, находящиеся в тормозящей фазе СВЧ колебаний ("правильно-фазные" электроны) в процессе взаимодействия, отдавая энергию СВЧ полю, постепенно оседают на аноде-сетке триода, и таким образом выводятся из взаимодействия с полем, не успев перейти в ускоряющую фазу поля. Своевременное поглощение электронов сеткой анода обеспечивается ее прозрачностью, которая должна иметь определенное оптимальное значение.

Проведенные эксперименты с обратной связью показали, что в триоде с ВК оптимальную обратную связь можно получить, меняя длину камеры. При оптимальной длине камеры достигается резонансное взаимодействие осциллирующего электронного пучка с высокочастотным полем камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Д., Фоменко Г.П. Генерация мощного СВЧ излучения релятивистским пучком в триодной системе // Письма в ЖТФ. - 1979. - Т. 5, вып. 6. - С. 321-324.
2. Didenko A.N., Fomenko G.P., GleIzer I.Z., Krasik Ya.E., Melnikov G.V., Perelygin S.F., Shtein Yu.G., Sulakshin A.S., Tsvetkov V.I., Zehrlitsyn A.G. Generation of high power RF-pulses in magnetron and reflex triode systems // High Power Electron and Ion Beam Research and Technology. Proc. III Intern. Conf., Novosibirsk. - 1979. - V. 2. - P. 683-691.
3. Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Фоменко Г.П., Цветков В.И. Получение мощных импульсов СВЧ излучения микросекундной длительности в триоде с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. - 1985. - Т. 11, вып. 17. - С. 1083-1086.
4. Привезенцев А.П., Филипенко Н.М., Фоменко Г.П. Нелинейная теория электронного потока в триодной системе с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. - 1985. - Т. 30, вып. 4. - С. 756-760.

5. Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Филипенко Н.М., Фоменко Г.П. Исследование механизма группировки в СВЧ триоде с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. - 1987. - Т. 32, вып. 4. - С. 837-840.
6. Гадецкий Н.П., Магда И.И., Найстетер С.И., Прокопенко Ю.В., Чумаков В.И. Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью - виртод // Физика плазмы. - 1993. - Т. 19, вып. 4. - С. 530-537.

УДК 620.179.13